

Rapport de TIPE

Comparaison des performances de moteurs synchrones à destination des sports automobiles

Aloïs COQUILLARD

Candidat n°37800, filière PC

Réalisé avec
Victor GUEUDELLOT
élève en PC* au
Lycée H. POINCARÉ
de Nancy

Supervisé par
André DOMPS
Professeur encadrant
Denis NETTER
Enseignant chercheur

Résumé

L'objectif de ce TIPE a été de construire et de comparer, selon des critères physiques précis, quantitativement mesurables et de notre point de vue pertinents, les différents types de moteurs électriques triphasés synchrones usuels afin d'envisager lequel serait le plus adapté pour une utilisation dans les sports mécaniques.

Table des matières

1	Préambule	2
2	Choix et fonctionnement des moteurs étudiés	2
2.1	Restriction aux moteurs triphasés synchrones	2
2.2	Types de moteurs envisageables	3
3	Création des moteurs	5
3.1	Choix du stator	5
3.2	Conception des modèles 3D et prototype plastique	6
3.3	Réalisation des moulages en fonte	6
4	Conception d'un banc de test	7
4.1	Création d'une source de tension triphasée synchrone	7
4.2	Création d'un capteur de couple dynamique	8
4.3	Protocole expérimental	8
5	Expérimentations et résultats	9
5.1	Différences qualitatives	9
5.2	Mesures du couple statique	10
5.3	Mesures du couple dynamique et du rendement	11
6	Conclusion	13
	Références	14
	Articles d'actualité - vulgarisation	14
	Fiches techniques	14
	Articles scientifiques	14
	Annexe 1 : Conception d'un amplificateur de classe D	15
	Annexe 2 : Création d'une source triphasée via un dynamoteur	16
	Annexe 3 : Théorie autour du MRS	17
	Annexe 4 : Schéma électrique complet	19

1 Préambule

L'origine de ce projet de TIPE est l'intérêt pour une nouvelle technologie.

L'industrie automobile électrique est en pleine expansion. Du fait de ses avancées majeures et de sa fiabilité éprouvée, la voiture électrique commence à se faire une place dans les transports ainsi que dans la course automobile. Bien que les types de moteurs utilisables soient très diversifiés, les constructeurs n'en utilisent pourtant quasiment qu'un seul : le moteur synchrone triphasé, décliné en diverses versions. Notre objectif au cours de ce TIPE sera de voir les différents avantages de ces multiples déclinaisons afin de comprendre pourquoi ce type de moteur est privilégié dans les véhicules électriques performants.

Merci à Denis NETTER, chercheur au GREEN et professeur de physique à l'ENSEM, dont l'aide sur la compréhension de ces moteurs a été précieuse.

2 Choix et fonctionnement des moteurs étudiés

Ici seront expliqués les principes physiques de fonctionnement des moteurs que nous avons choisi d'étudier, ainsi que les motivations de ces choix et comment nous les avons construits.

2.1 Restriction aux moteurs triphasés synchrones

Il existe de nombreuses technologies animant les moteurs usuels. Il s'avère difficile de mes discriminer car, comme le surligne Denis NETTER :

« Il n'y a pas de bon ou de mauvais moteur, car tout type de moteur a moyen de devenir extrêmement performant si l'on y met l'argent et les moyens techniques. »

Nous ne nous intéresserons toutefois qu'aux principaux types de moteurs triphasés synchrones, du fait de leur place prééminente dans l'industrie automobile, leur fiabilité, leur simplicité de conception et leur capacité à maintenir une vitesse de rotation constante, ce qui facilite l'analyse quantitative des performances, contrairement aux moteurs asynchrones dont le couple dépend de nombreux paramètres (voir figure 1).

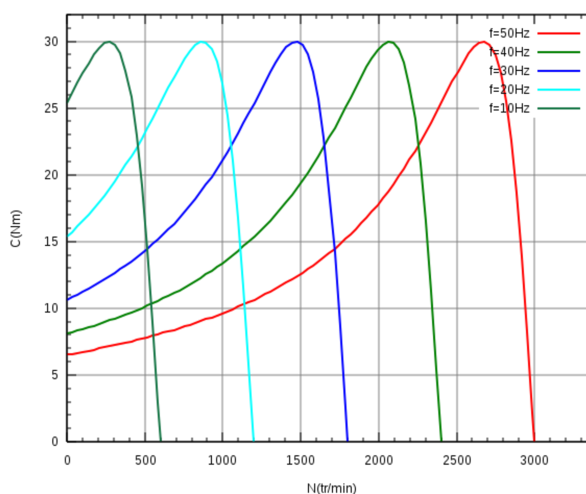


FIGURE 1 – Courbes de couple typiques d'un moteur asynchrone à diverses fréquences.

2.2 Types de moteurs envisageables

Nous nous sommes intéressés aux deux principaux types de moteurs synchrones.

2.2.1 Moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)

Depuis son invention par Tesla [1], le **moteur alternatif synchrone** a beaucoup évolué. Initialement constitué d'un rotor à électro-aimants alimentés par balais, il fut plus tard amélioré en remplaçant ceux-ci par des **aimants permanents**, et c'est ce type de moteur (MSAP) que nous étudierons.

Le fonctionnement de ce moteur (et du suivant) repose sur le **théorème de Ferraris**, ici énoncé pour un système triphasé (généralisable à N phases [2]) :

Théorème de Ferraris

Trois bobines parcourues par un système de courants triphasé équilibré et décalées de 120° produisent au centre un champ magnétique tournant à la pulsation des courants.

On considère un aimant permanent de moment magnétique \vec{M} placé au centre de l'axe. En se plaçant dans l'**approximation dipolaire**, on peut exprimer le couple qu'il subit :

$$\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}$$

Le rotor tourne donc à la vitesse du champ tournant (vitesse synchrone, sinon $\langle \Gamma \rangle = 0$), avec un angle de retard θ sur celui-ci dépendant du couple demandé. Le couple maximal est atteint en $\theta = \frac{\pi}{2}$, où le produit vectoriel est maximal.

Ceci peut se généraliser [2], donnant alors $\Gamma(\theta) = \Gamma_0 \sin(\theta)$ avec θ le déphasage rotor-champ magnétique et Γ_0 proportionnel à ϕ et donc à i^1 .

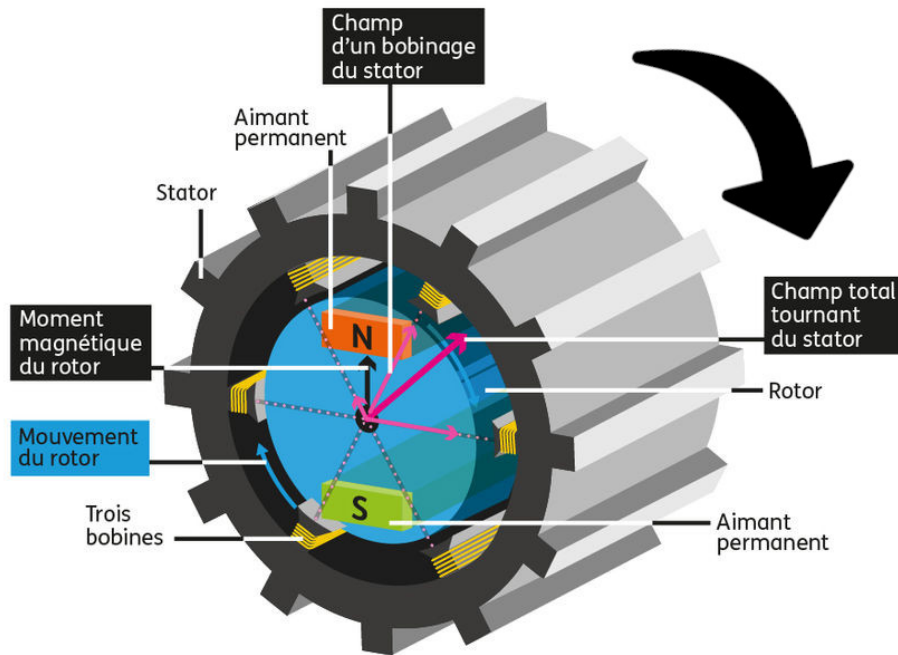


FIGURE 2 – Schéma du MSAP dans sa configuration la plus simple [3]. On remarque que \vec{M} a du retard sur \vec{B} , générant le couple nécessaire à la rotation du rotor.

1. Voir [2] pour plus de précisions, sinon se rappeler que $\phi = Li$.

Cependant, de nombreux moteurs utilisent non pas un champ magnétique tournant à deux pôles mais un champ multipôles. Afin entre autres de faciliter la construction des moteurs, nous avons choisi de nous concentrer sur une **construction à 2 paires de pôles**.

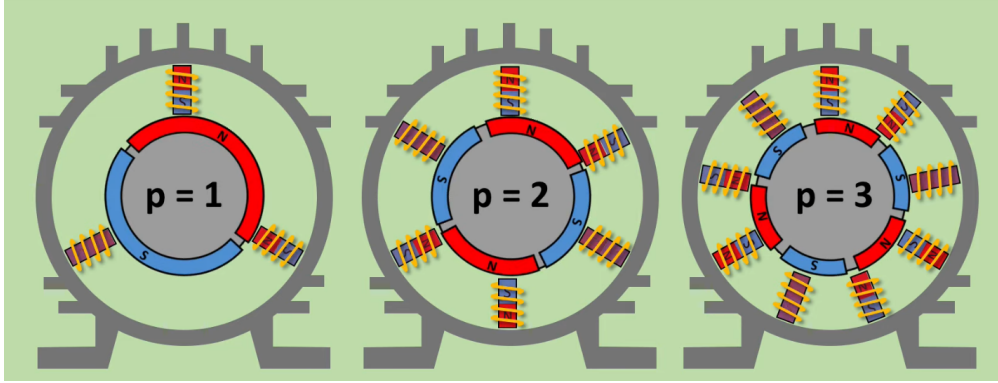


FIGURE 3 – Schémas de MSAP à 1, 2 et 3 paires de pôles (resp. 2, 4 et 6 pôles) [4].

On a alors :

$$\Omega_{rotor} = \frac{\Omega_{courant}}{p} \quad \text{avec } p \text{ le nombre de paires de pôles [4]. Aussi, } \boxed{\Gamma(\theta) = \Gamma_0 \sin(p\theta)}$$

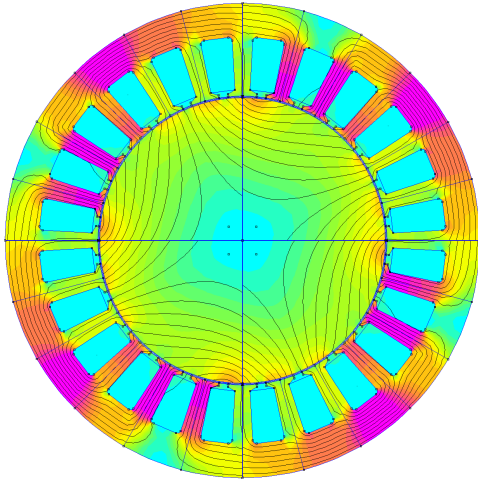


FIGURE 4 – Modélisation des lignes de champ magnétique réalisée sur FEMM.

Afin de visualiser les lignes de champ, Victor GUEUDELOT a manipulé le logiciel *FEMM*² qui utilise la **méthode des éléments finis**. C'est un mode de résolution discrétisant les données du problème pour déterminer des solutions numériques approchées des équations de Maxwell. On peut voir ci-contre une modélisation des lignes de champ magnétique dans un rotor de fer plein cylindrique pour un stator à 4 pôles.

Pour s'adapter à cette nouvelle configuration, il est nécessaire de concevoir un rotor avec $2p$ aimants, et donc ici 4. On peut voir ci-dessous des configurations fonctionnelles de rotors pour MSAP à 4 pôles.

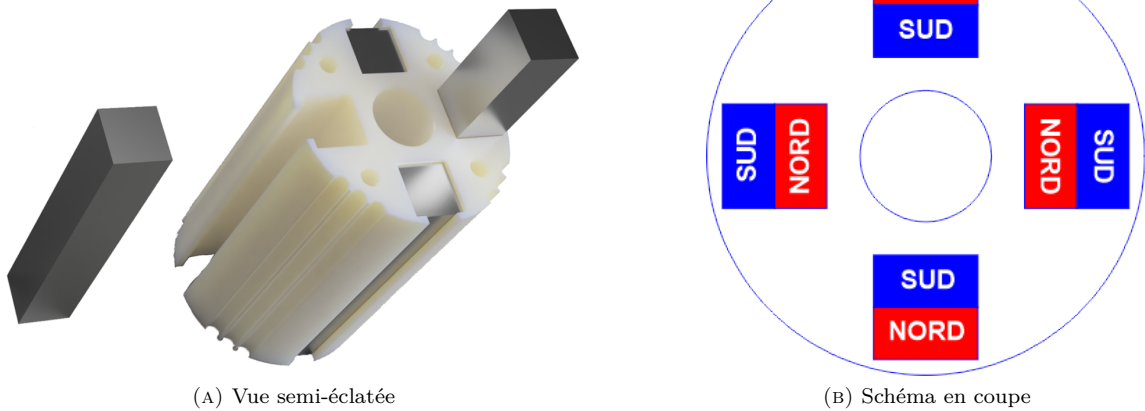


FIGURE 5 – Exemples de rotors 4 pôles de MSAP [5].

2. Il a utilisé le module d'interface python *Pyleecan* qui a permis d'avoir accès à des formes standards de stators

2.2.2 Moteur à réluctance synchrone (MRS)

Comme le MSAP, le **moteur à réluctance synchrone** (MRS) se base sur un champ tournant. Cependant, le rotor est un bloc de matériau ferromagnétique, usuellement du fer doux et non un aimant permanent. Celui-ci va, sous l'effet du champ magnétique du stator, s'orienter suivant les mêmes lignes de champ pour maximiser le flux magnétique et ainsi tourner à la vitesse synchrone.

Une explication thermodynamique détaillée du phénomène³ est rédigée en Annexe 3.

Il y est globalement expliqué qu'en manipulant la coénergie magnétique, on peut démontrer qu'il existe une **inductance caractéristique** du rotor L_1 telle que le couple s'exprime en première approximation :

$$\Gamma(\theta) = \left. \frac{\partial E_m^{co}}{\partial \theta} \right>_i \simeq L_1 i^2 \sin(2\theta) \text{ avec } \theta \text{ le retard du rotor sur le champ magnétique.}$$

Dans le cas d'un moteur à 2 paires de pôles, on peut montrer que :

$$\Gamma(\theta) = \left. \frac{\partial E_m^{co}}{\partial \theta} \right>_i \simeq L_1 i^2 \sin(4\theta)$$

Afin de maximiser L_1 , on fait épouser au rotor les lignes de champ magnétique (comme visibles figure 4), donnant industriellement des formes données ci-contre.

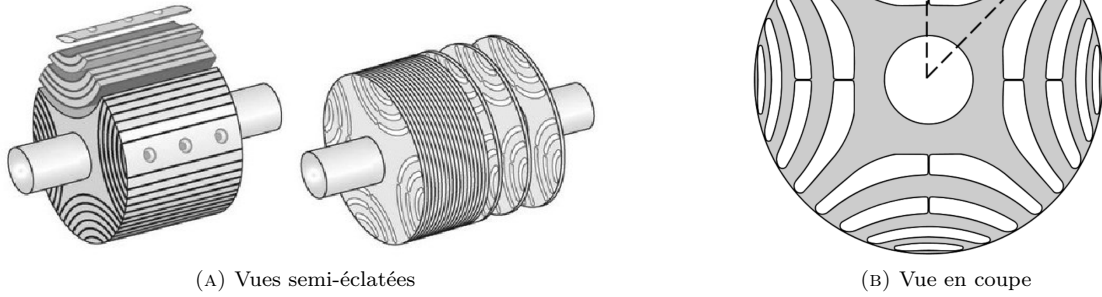


FIGURE 6 – Exemples de rotors 4 pôles de MRS industriels [6].

3 Création des moteurs

3.1 Choix du stator

Afin de minimiser les sources d'incertitudes dans nos mesures, nous nous sommes posés comme restrictions d'avoir le **même stator**, les **mêmes dimensions** et des **arbres de transmission identiques**.

Pour cela nous avons comme stator un corps de moteur triphasé asynchrone. Ses caractéristiques sont :

- diamètre d'axe 16mm
- diamètre intérieur 78mm
- bobinage 2 paires de pôles à 24 fentes
- résistance des bobines $9.8 \pm 0.1\Omega$
- branchement en étoile.

Il reste alors à réaliser les rotors, tâche fastidieuse car nécessitant du fer brut.

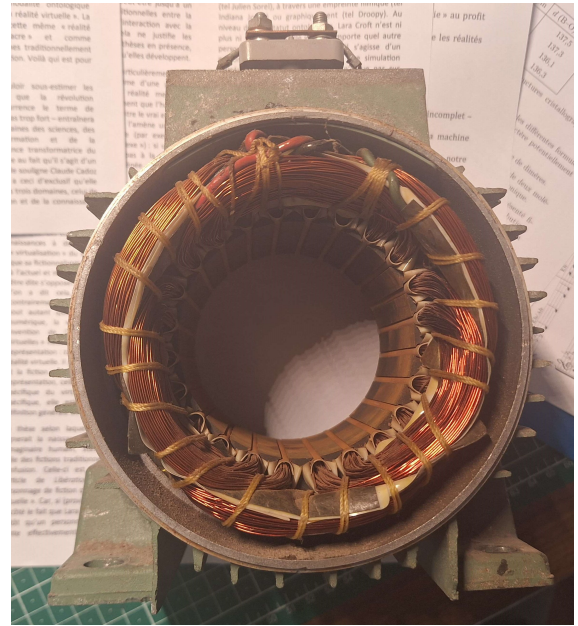


FIGURE 7 – Stator utilisé.

3. Merci au chercheur Denis NETTER qui nous a expliqué une partie de son cours de thermodynamique sur les moteurs, permettant la rédaction de ce paragraphe.

3.2 Conception des modèles 3D et prototype plastique

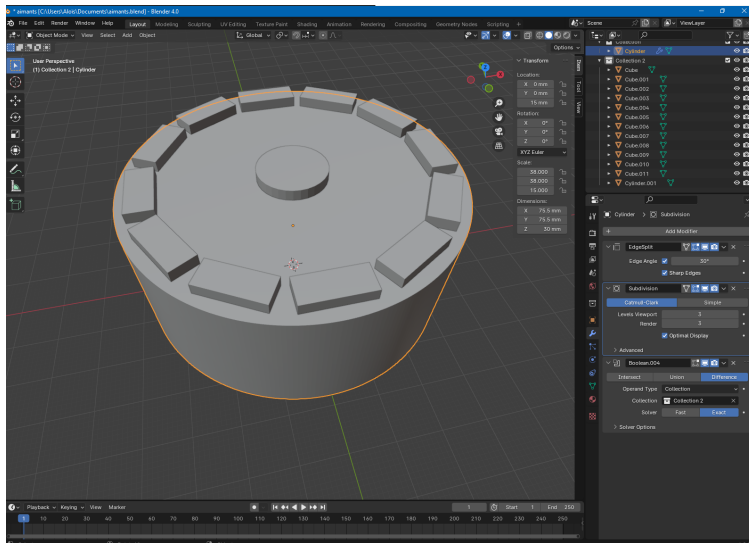


FIGURE 8 – Conception du rotor sous Blender.

Le premier rotor à avoir été modélisé est le MSAP du fait qu'un modèle en plastique (avec des cavités pour y placer des aimants) pouvait fonctionner immédiatement. Je l'ai conçu sur BLENDER pour recevoir 4x3 aimants pour former les 4 pôles.

Les aimants sont au néodyme (NdFeB) et produisant de l'ordre de 5 Tesla, de 30mm de long. Cette longueur imposera l'épaisseur de ce rotor et des autres pour une comparaison cohérente.

Le rotor a ensuite été **imprimé en 3D** en PETG afin d'être testé.

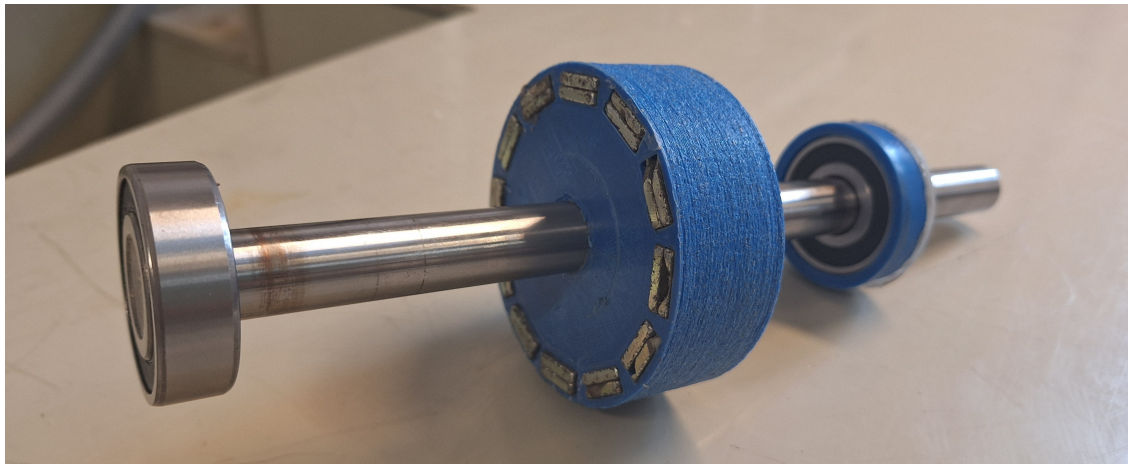


FIGURE 9 – Rotor en plastique prêt à être installé.

3.3 Réalisation des moulages en fonte

Le rotor en plastique étant fonctionnel, nous décidons de **réaliser les pièces en métal**.

Nous remercions l'équipe pédagogique du BTS Fonderie du lycée LORITZ de Nancy et l'étudiant Sam PRESLE pour nous avoir aidé à finir les modélisation et **permis la coulée** de ces pièces. Le reste des modèles a été réalisé sur le logiciel SOLIDWORKS afin de permettre aux fondeurs de réaliser des calculs de rétraction. Ils ont ensuite été imprimés en 3D pour servir de base aux moules en sable à prise chimique dans lesquels sera versée la fonte.

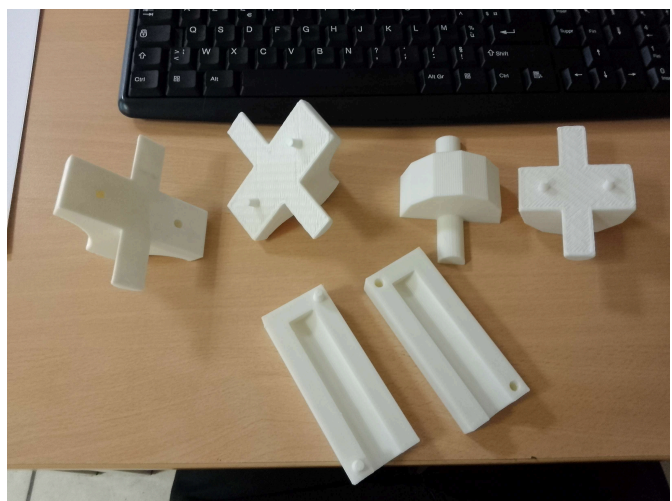


FIGURE 10 – Pièces en plastiques servant à la fabrication des moules en sable.



FIGURE 11 – Moule avant et après la coulée au lycée LORITZ.

Le modèle à réluctance est similaire au rotor industriel discuté précédemment, mais a été simplifié pour des raisons de solidité mécanique, après conseil de Denis NETTER. Malheureusement **la coulée s'est mal passée** et tout juste 2/3 des rotors a été fondu. Seul le rotor du MRS a pu être rattrapé (voir figure 12).



(A) Rotor MSAP métal inachevé



(B) Rotor MRS après soudage et polissage

FIGURE 12 – Les deux rotors métalliques après traitement.
ig :example

4 Conception d'un banc de test

4.1 Création d'une source de tension triphasée synchrone

L'objectif de cette partie est de créer trois signaux sinusoïdaux **déphasés de 120°** , capables de délivrer de **grandes puissances** sans être déformés. **Un schéma électrique complet est disponible en fin de document.**

Nous avons d'abord construit un amplificateur à très faible impédance de sortie et grande puissance ; les recherches sont détaillées dans l'**Annexe 1**.

Nous avons ensuite fabriqué un dispositif permettant de produire une tension triphasée d'amplitude constante, et de fréquence contrôlable ; ceci est décrit dans l'**Annexe 2**. Ce montage était cependant instable. Nous avons donc finalement utilisé un contrôleur électronique [7] relié à notre amplificateur de puissance.

4.2 Création d'un capteur de couple dynamique

La fabrication d'un capteur de couple dynamique est complexe, surtout pour des mesures précises et prolongées. Des dispositifs utilisant des frottements ou la gravité, proposés par nos enseignants, n'étaient pas adéquats. J'ai conçu un montage semblable à un frein de PRONY, avec des pièces imprimées en 3D :

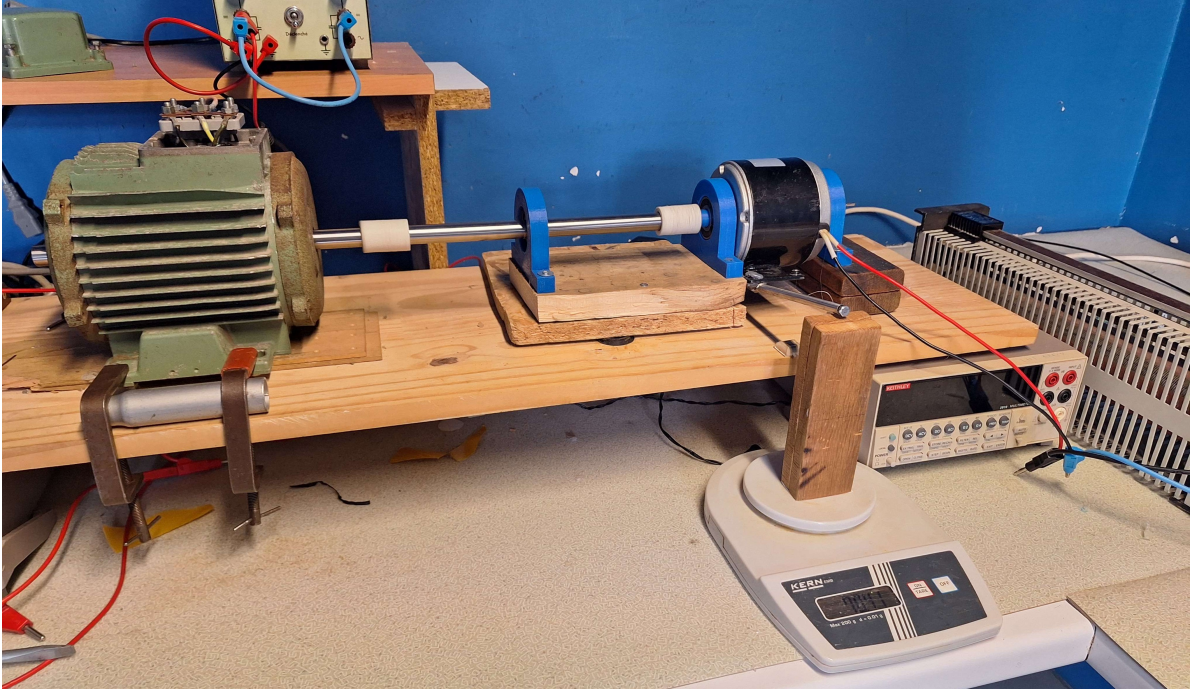


FIGURE 13 – Dispositif de mesure du couple dynamique

On connecte l'axe du moteur à tester à l'axe d'un générateur électrique via un tube en TPU. Ce générateur (ici un moteur CC 36V 250W) est ensuite relié à un rhéostat qui va dissiper l'énergie produite et permettre de choisir la charge appliquée au moteur. La particularité du montage est que le stator du moteur CC est libre de tourner sur lui-même car monté sur roulements à bille. Un axe de longueur b est ensuite attaché au corps du moteur pour faire bras de levier, et son extrémité est posée sur une balance pour mesurer la force appliquée. On peut ainsi mesurer le couple résultant Γ ; on en déduit aussi la **puissance mécanique transmise** P par les formules :

$$P = \Omega \times \Gamma \quad \text{et} \quad \Gamma = F \times b = g \times m \times b$$

avec Ω la vitesse de rotation, g le champ de pesanteur et m la masse mesurée par la balance. Ceci nous permettra de **calculer un rendement**. Les sources d'incertitudes sont b (20 ± 1 cm) et m (à 1 g près), ce qui nous donne un majorant des incertitudes par la méthode quadratique (type B).

4.3 Protocole expérimental

Il a été décidé de mesurer trois grandes caractéristiques de nos moteurs :

- Le couple statique
- Le couple dynamique
- Le rendement mécanique dynamique.

4.3.1 Mesure du couple statique

Pour la mesure du couple statique, on fixe un axe orthogonal à l'axe de rotation en sortie du moteur, à un angle θ de la position de repos (mesuré sur un rapporteur collé sur l'axe, voir figure 14) et on applique un champ magnétique statique \vec{B} dans le rotor (via un courant $i = 2 \pm 0.01$ A). La pointe de l'axe étant posée sur une balance, on mesure le couple et les incertitudes comme pour le capteur de couple dynamique. On recommence en variant θ .

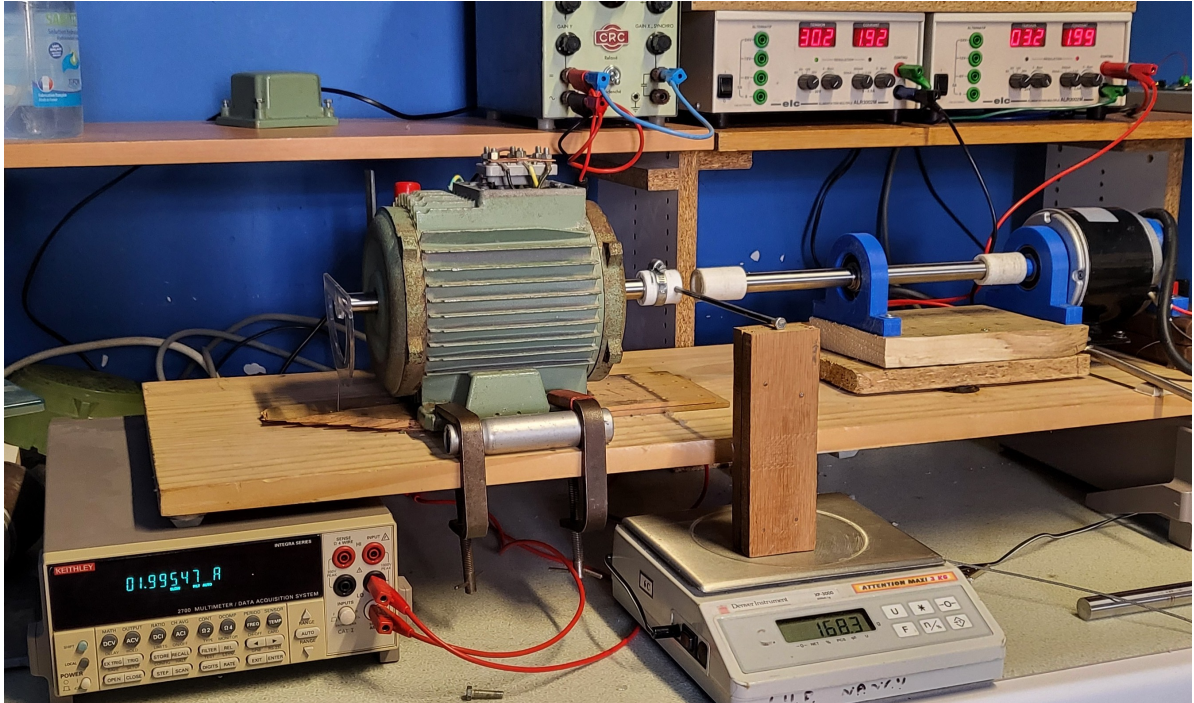


FIGURE 14 – Dispositif de mesure du couple statique

4.3.2 Mesure du couple dynamique

Le protocole est dépendant de l'électronique utilisée, que nous ne maîtrisons pas. Il se réalisera comme-ci :

1. Choisir un réglage du potentiomètre du contrôleur
2. Lancer le moteur à la vitesse de rotation associée
3. Appliquer graduellement une charge croissante au moteur CC (on décroît R)
4. Mesurer le couple conjointement

puis on réalise une autre série avec un paramétrage différent.

5 Expérimentations et résultats

5.1 Différences qualitatives

Une fois les rotors installés dans le corps du moteur, nous avons remarqué une différence majeure : le MSAP oppose une résistance au mouvement tandis que le MRS tourne librement. Cela s'explique du fait que **le MSAP est un moteur réversible**, contrairement au MRS.

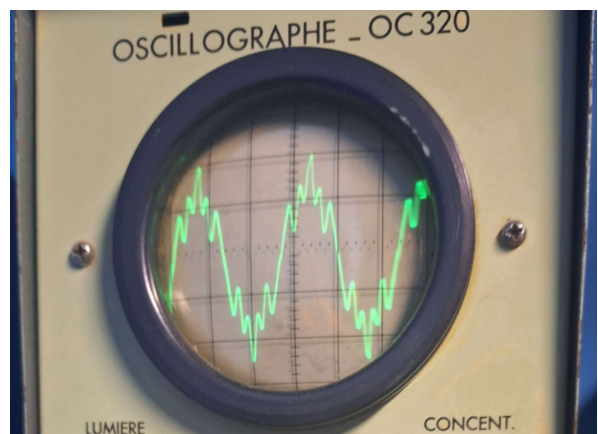


FIGURE 15 – Sortie du MSAP en configuration générateur

5.2 Mesures du couple statique

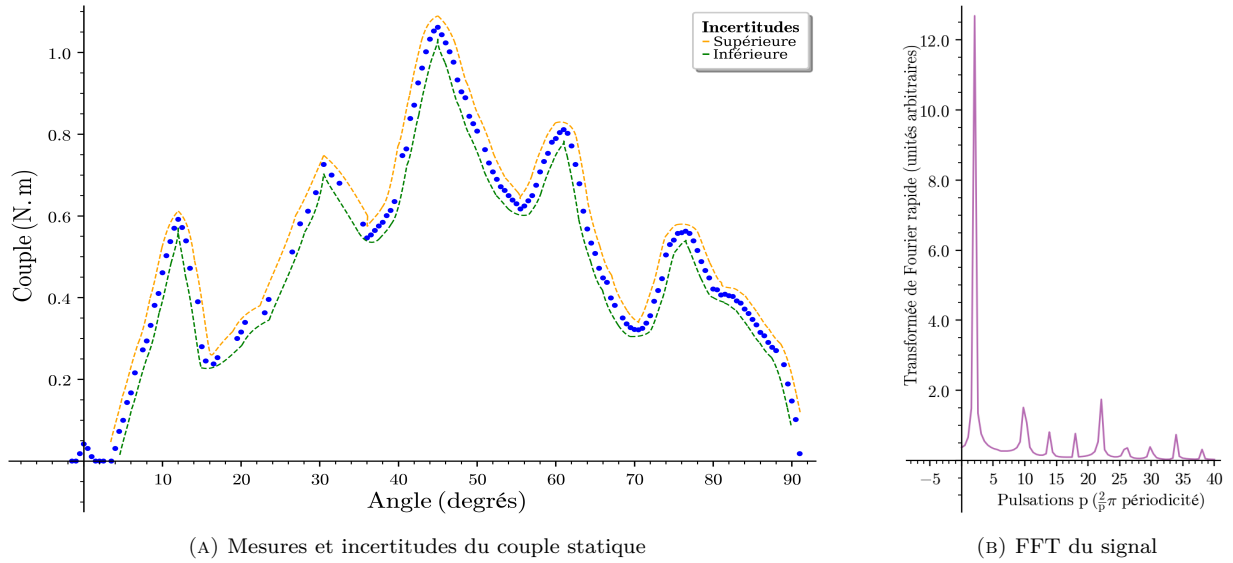


FIGURE 16 – Mesures et exploitations du couple statique, MSAP plastique

Les mesures pour le MSAP donnent une courbe de couple loin de la forme idéale, mais qui ressemble tout de même à un sinus. Ceci est confirmé par la **transformée de Fourier rapide** du signal⁴ qui donne une dominante claire à la fondamentale $\sin(2\theta)$. On remarque que les autres harmoniques sont de la forme $\sin(2p\theta)$, ce qui semble cohérent sachant que le rotor est de symétrie π -périodique. Le couple statique maximum mesuré est de $1,06 \pm 0,03$ N.m.

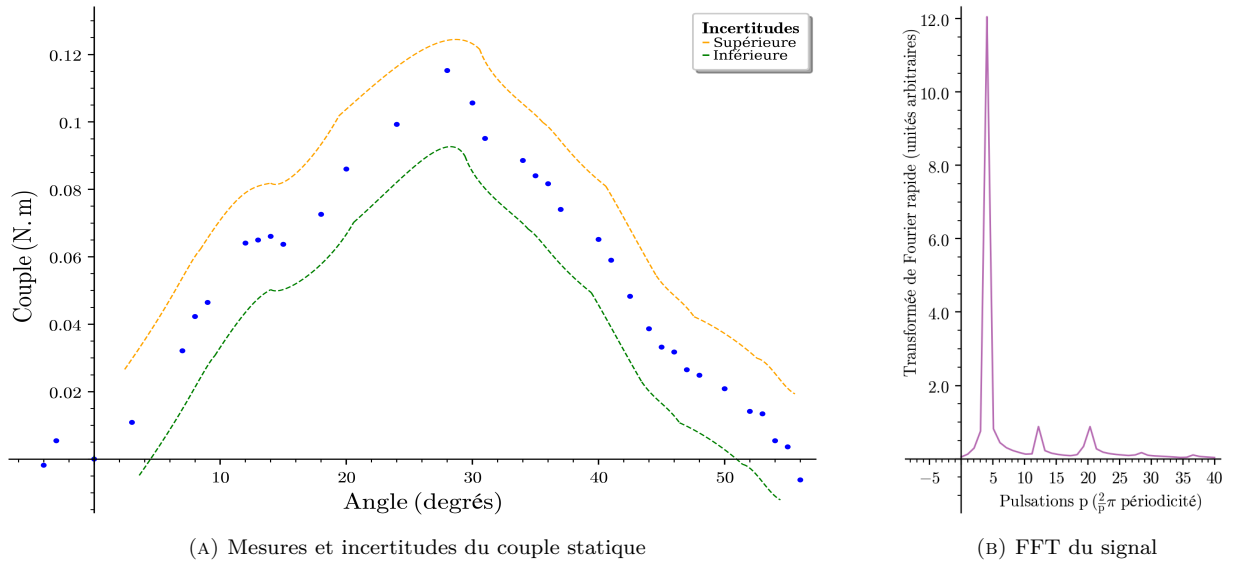


FIGURE 17 – Mesures et exploitations du couple statique, MRS

Les mesures du MRS donnent des conclusions similaires, à l'exception que la fondamentale est en $\sin(4\theta)$ comme attendu. Ces mesures comme les précédentes semblent **cohérentes avec la théorie autour du MRS et du MSAP**. Le couple maximal mesuré ici est de $0,11 \pm 0,03$ N.m, **bien plus faible que pour le MSAP**.

4. FFT réalisée avec `np.fft.fft`

5.3 Mesures du couple dynamique et du rendement

Plusieurs centaines de mesures manuelles permettent de créer ces histogrammes :

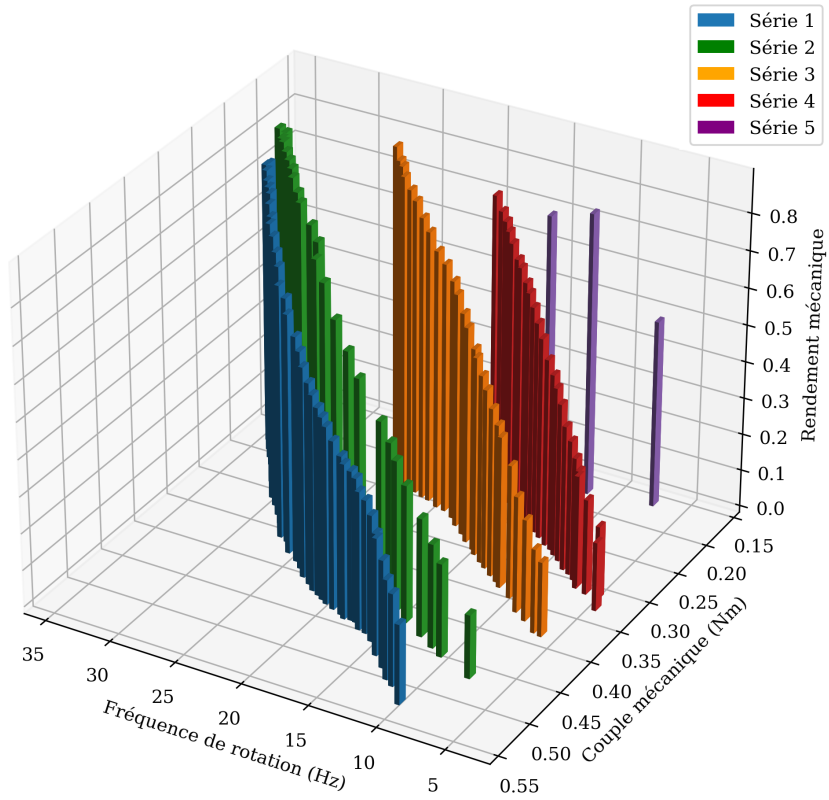


FIGURE 18 – Représentation 3D du rendement du MSAP à fréquence et appel de couple variés

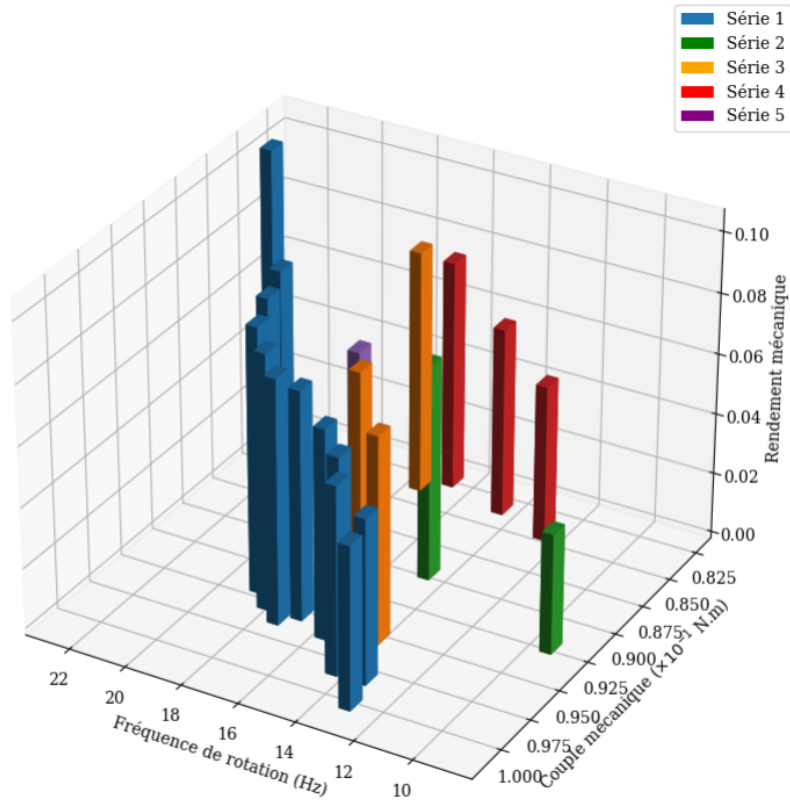


FIGURE 19 – Représentation 3D du rendement du MRS à fréquence et appel de couple variés

On observe qualitativement que le rendement s'effondre si la vitesse de rotation diminue ou si le couple augmente, le maximum observé étant de $87 \pm 1\%$ pour le MSAP et de $10 \pm 1\%$ pour le MRS. Le rendement du MRS est **globalement médiocre**.

Des figures plus exploitables sont celles du rendement en fonction du couple, à vitesse de rotation constante :

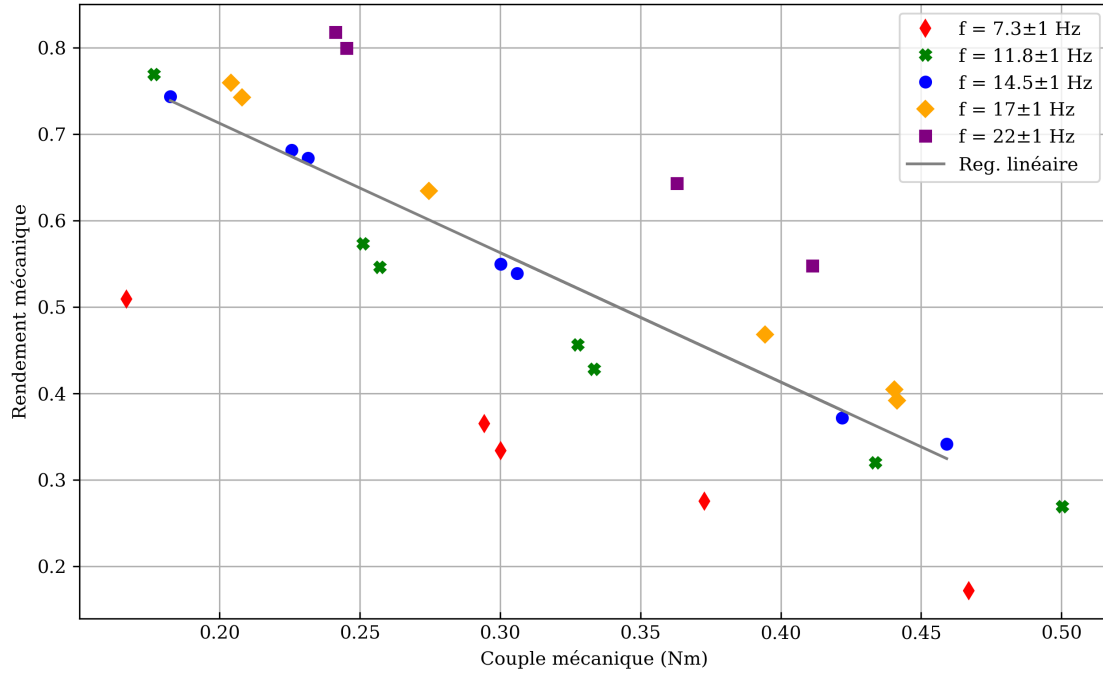


FIGURE 20 – Rendement en fonction du couple à Ω constant, MSAP.

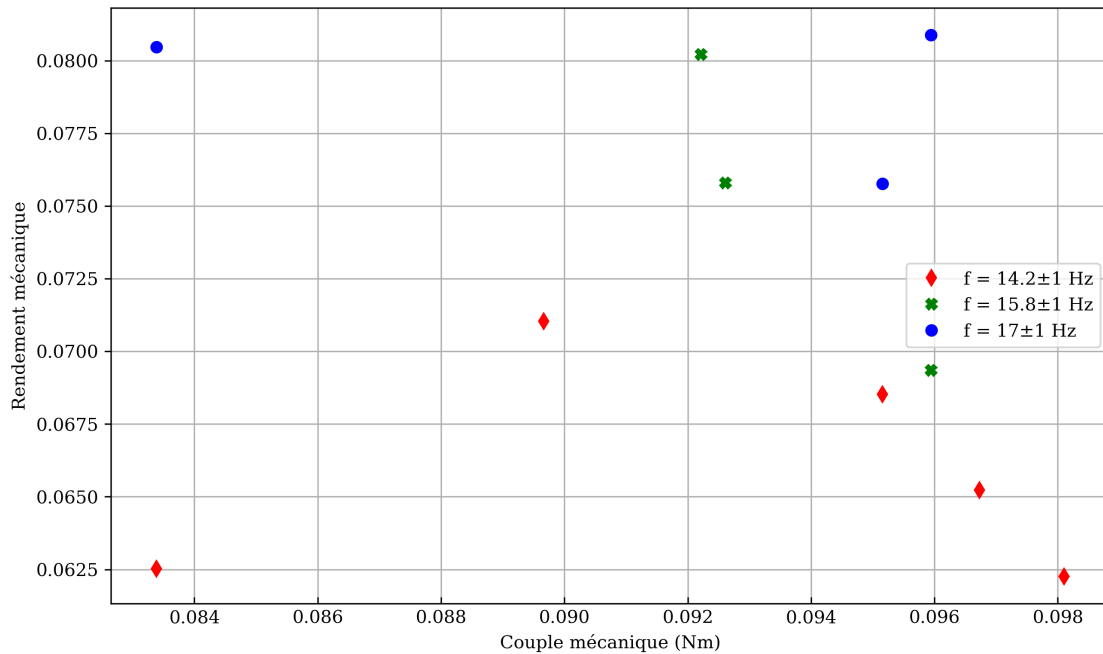


FIGURE 21 – Rendement en fonction du couple à Ω constant, MRS.

Il semble y avoir une **relation affine entre le couple et le rendement** pour le MSAP si l'on fixe la vitesse de rotation, le rendement tendant à chaque fois vers 1 pour $\Gamma = 0$ ⁵. Les mesures du MRS semblent **inexploitables**.

6 Conclusion

Par leurs fonctionnements distincts, le MRS et le MSAP offrent des avantages propres[8]. Bien que le MSAP soit historiquement dominant, le potentiel du MRS le rend de plus en plus prisé, parfois hybridé avec un MSAP dans les voitures récentes[9].

Le MRS semble prometteur comme moteur électrique plus écologique et fiable (pas d'aimants), bien que ses performances et son rendement restent à améliorer. Ceci fait l'objet de nombreuses recherches actuelles[10][11][6], complémentées par d'autres sur l'optimisation de la solidité mécanique de celui-ci[12], qui reste au vu de sa forme un challenge pour concevoir des moteurs à haute vitesse de rotation.

5. D'après des régressions linéaires avec `numpy.polyfit`

Références

Articles d'actualité - vulgarisation

- [3] L'USINE NOUVELLE. *Moteurs électriques : les trois technos en compétition pour propulser l'auto*. 9 avr. 2021. URL : <https://www.usinenouvelle.com/article/moteurs-electriques-les-trois-technos-en-competition-pour-propulser-l-auto.N1808957>.
- [4] L'antre de la connaissance (CPGE TSI - COLMAR). *S02 E04 convertisseurs électromagnétiques part 3 paires de poles*. 4 oct. 2021. URL : <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=4BQd7FUH2ls>.
- [5] HYDROTURBINE.INFO. *Transformation d'un moteur asynchrone triphasé en génératrice synchrone à aimant permanent*. 23 fév. 2023. URL : <https://hydroturbine.info/transformation-dun-moteur-asynchrone-triphasé-en-generatrice-synchrone-a-aimant-permanent/>.
- [8] THE WEEK. *Much Needed Research Breakthrough in 'Electric Motor Drivelines' is HERE*. 17 mai 2023. URL : <https://www.theweek.in/focus/economy/2023/05/17/much-needed-research-breakthrough-in-electric-motor-drivelines-is-here.html>.
- [9] YOGESHWARI S GADDAM for LESICS. *Tesla model 3's IPM-SynRM electric motor*. 28 jan. 2021. URL : https://www.lesics.com/tesla-model-3_s-ipm-synrm-electric-motor.html.
- [15] KE4MCL. *Reviving a WW2 Dynamotor, How Tube Radios Went Mobile During the War*. 2013. URL : <https://www.instructables.com/reviving-a-WW2-dynamotor-how-tube-radios-went-mob/>.

Fiches techniques

- [1] Nikola TESLA. « Electro magnetic motor ». US patent 0,381,968. 1^{er} mai 1888. URL : <https://patents.google.com/patent/US381968A/>.
- [7] JUYITECH. « Brushless DC motor controller IC ». JY01. 20 oct. 2017. URL : https://www.bldcmotor-driver.com/photo/bldcmotor-driver/document/44948/JY01_V3.5_-English.pdf.
- [13] TEXAS INSTRUMENTS. « Low Voltage Offset Dual Comparators ». LM 393. 1999, Revised 10/2018. URL : <https://www.ti.com/lit/gpn/LM393-N>.
- [14] INTERNATIONAL RECTIFIER. « High and Low Side Driver ». IR 2101. 2 avr. 2004. URL : https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ir2101-DS-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c7a755166c.
- [16] ANALOG DEVICES. « 500 MHz, Linear-in-dB VGA with AGC Detector ». AD 8367. 2005. URL : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8367.pdf>.

Articles scientifiques

- [2] Jean-Marie BRÉBEC et al. *Électronique II PSI*. Collection HPrépa, Hachette Supérieur, 1997, p. 103-128. ISBN : 9782011452016.
- [6] M. Muratlyev et AL. « Synchronous Reluctance Machines : A Comprehensive Review and Technology Comparison ». In : *IEEE* (2021). URL : https://nottingham-repository.worktribe.com/preview/7784932/SynRel_Review_Review_Final.pdf.
- [10] Federica UBERTI, Lucia FROSINI et Loránd SZABÓ. « A New Design Procedure for Rotor Laminations of Synchronous Reluctance Machines with Fluid Shaped Barriers ». In : *Electronics* (2022). URL : <https://doi.org/10.3390/electronics11010134>.
- [11] Ashwin Kavasseri VENKITARAMAN et Venkata Satya Rahul KOSURU. « Trends and Challenges in Electric Vehicle Motor Drivelines - A Review ». In : *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems* 14.4 (25 avr. 2023). URL : <https://doi.org/10.32985/ijeces.14.4.12>.
- [12] Andrea CREDO et al. « High speed synchronous reluctance motors for electric vehicles : a focus on rotor mechanical design ». In : *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)* (2019). URL : http://www.refreedrive.eu/wp-content/downloads/IEMDC_UAQ_2019_FullPaper.pdf.

Annexe 1 : Conception d'un amplificateur de classe D

Il existe différentes façons d'amplifier un signal électrique linéairement. La seule au programme de CPGE est l'ALI en configuration suiveur ou amplificateur (inverseur ou non), mais les ALI conventionnels disposent d'un courant de saturation très faible ($i_{sat} \approx 50$ mA pour un TL081), bien trop faible pour alimenter un bobinage de moteur.

Pour réaliser un montage d'amplification de puissance, il existe plusieurs stratégies :

- Les **amplificateurs linéaires** transistorisés (montages dits de type A, B, AB ou encore H).
- Les **amplificateurs à hachage du signal**, (montages dits de classe D ou PWM⁶).

Le premier type d'amplificateur utilise la région linéaire d'un transistor (ou d'une triode) pour faire varier la conductivité de celui-ci, de manière analogue à une résistance variable. Ce système est utilisé dans la majorité des amplificateurs audios et les alimentations linéaires. Bien que très simples, ces montages ont pour principal défaut un rendement faible voire médiocre du fait de leur fonctionnement dissipatif (effet JOULE), ce qui impose des composants volumineux, une alimentation robuste et surtout une grande surface de dissipation.

Ces montages sont **clairement déconseillés pour des applications à fort courant**, et, bien que précis et fidèles (les montages de type A sont très prisés des audiophiles, surtout ceux à tubes), il nous paraît inutile de les considérer ici.

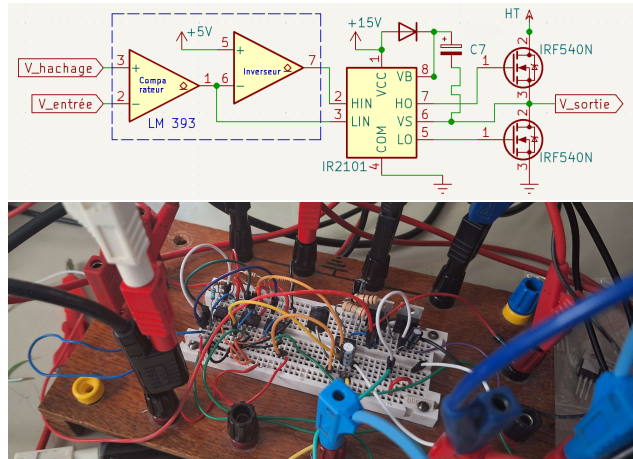


FIGURE 22 – Notre montage de classe D, illustré.

Le second type d'amplificateur, dit de classe D, est très différent de ses homologues : il ne fonctionne qu'en tout ou rien, les transistors ayant un comportement analogue à un relais (c'est-à-dire un interrupteur commandé électriquement). Pour cette raison, on privilégiera des transistors de type MOSFET⁷.

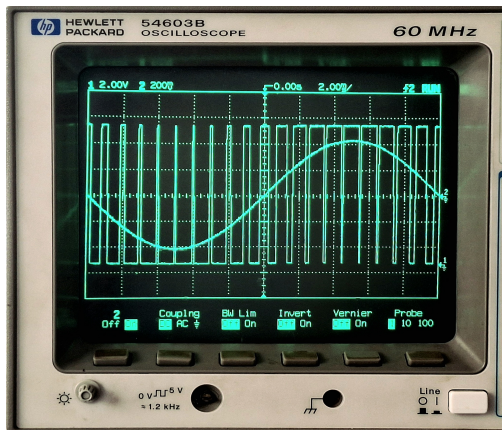


FIGURE 23 – Exemple du traitement d'un amplificateur de classe D sur un signal sinusoïdal. La fréquence de découpage est volontairement trop faible afin de voir les effets de moyennage par variation du rapport cyclique.

Le montage se base sur un ALI en mode comparateur. Supposons que l'on traite un signal $S(t)$ de valeur moyenne nulle et dont le spectre a pour plus haute fréquence f_1 . On va hacher S via un signal triangulaire $S'(t)$, de même amplitude et de fréquence $f_2 \gg f_1$ ⁸, en branchant le comparateur de sorte que si $S'(t) > S(t)$, on ait en sortie $v_s = v_{sat}$, et $v_s = -v_{sat}$ sinon. On branche la sortie sur un petit contrôleur⁹ qui contrôle les *grilles* de deux MOSFET qui commutent une tension continue et la masse respectivement¹⁰; voir schémas ci-dessus.

Soit δt un temps très petit devant $1/f_1$ mais assez grand devant $1/f_2$. On va alors pouvoir considérer que pendant δt , $S(t) \approx cte$. Pendant ce temps, S' varie de plusieurs périodes et produit un signal carré $v_s(t)$ dont le rapport cyclique dépend de S . On peut montrer mathématiquement que, en sortie du comparateur et pendant δt :

$$\langle v_s(t) \rangle = S(t).$$

Ainsi on peut grâce à un tel montage commuter des hautes tensions plus facilement et donc **contrôler des appareils de puissance**, le rapport d'amplification dépendant juste de la tension d'alimentation des MOSFET.

6. *Pulse Width Modulation* pour Modulation à Largeur d'Impulsion.

7. Ce sont des transistors particuliers (à effet de champ à grille métal-oxyde) qui sont asservis en tension et non en courant, et fonctionnent en tout ou rien, avec une tension de seuil de l'ordre du volt. Ils ont de plus un temps de réponse de l'ordre de la dizaine de nanosecondes et une résistance interne très faible, ce qui en fait un composant de choix pour ce genre de montage et dans les montages PWM habituels comme les alimentations à découpage.

8. le comparateur LM393 utilisé dispose d'une réponse correcte pour une fréquence d'entrée jusqu'à 30 kHz, voir [13].

9. **IR2101**, il sert à isoler le circuit de la haute tension de la partie puissance, voir [14]. Imaginer sinon que HI/HO et LIN/LO sont connectés.

10. On appelle cette configuration un *pont en H*, elle est analogue à un pont de diodes fonctionnant à l'envers.

Annexe 2 : Création d'une source triphasée via un dynamoteur

L'idée originale prise par notre groupe pour avoir à disposition une source triphasée asservie en fréquence était de tout simplement utiliser des GBF de travaux pratiques, quitte à en prendre plusieurs. Cependant, les GBF de notre lycée n'étaient capables de fournir au maximum que 2 signaux déphasés et il était impossible d'en coupler plusieurs. Ne voulant pas nous lancer dans des analyses en biphasés, nous avons d'abord songé à fabriquer le signal numériquement (à partir d'un arduino par exemple), mais au vu de la complexité de la chose nous nous sommes rabattus vers un projet plus simple : faire du triphasé comme le font la plupart des générateurs, avec **un alternateur triphasé**^[15].

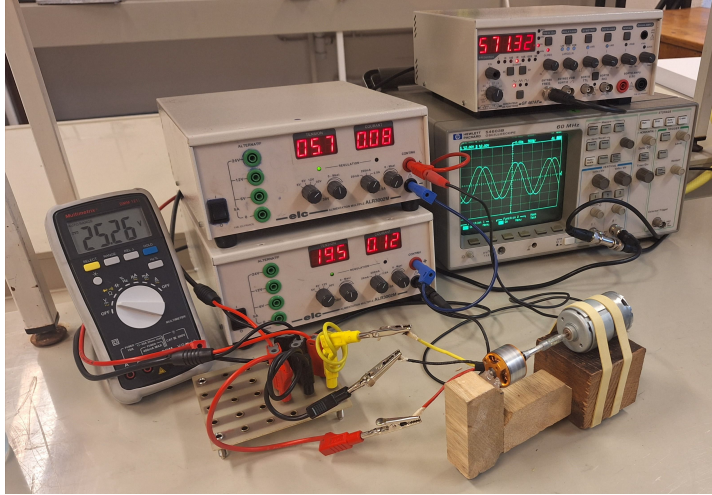


FIGURE 24 – Notre montage. La tension d'entrée est visible à gauche et la fréquence de sortie en haut à droite.

Le montage consiste en un moteur électrique à courant continu dont l'arbre de transmission est relié à celui d'un générateur triphasé synchrone¹¹. Ainsi, lorsque l'ensemble tourne, la vitesse de rotation Ω_m du moteur vaut celle du générateur Ω_g , et donc celle du signal électrique triphasé induit.

Pour contrôler la valeur de Ω_m , il existe une loi qui lie celle-ci proportionnellement à la tension d'entrée :

$$\Omega_m = K_m \times U$$

avec K_m dépendant du moteur. Il suffit donc de déterminer K_m en mesurant Ω_m pour différentes valeurs de U puis de faire une régression linéaire. Nos mesures ont donné $K_m = 22.80 \pm 0.08 \text{ Hz/V}$ ¹², avec une sortie stable de environ 3V à 60V en entrée.

Il a cependant été remarqué expérimentalement que l'amplitude du signal de sortie était elle aussi environ proportionnelle à Ω_g , ce qui est indésirable car le signal d'entrée de l'amplificateur de classe D suivant doit être d'amplitude constante. Pour compenser cela, nous avons eu l'idée d'appliquer un montage ALI intégrateur en sortie de chaque phase, ce qui appliquera un gain proportionnel à $1/\Omega_g$ et donnera ainsi une amplitude de sortie approximativement constante indépendamment de la fréquence du signal. Pour être sûr cependant que le gain reste constant, les signaux résultants seront passés dans des amplificateurs à contrôle de gain constant (AGC) dont la sortie est rigoureusement constante¹³.

Il existe néanmoins un couple de décrochage à partir duquel Ω n'augmente plus linéairement voire diminue. Ceci n'est pas un problème dans notre cas car la charge demandée au moteur est quasiment nulle à part au démarrage, l'alternateur triphasé n'appliquant qu'une (faible) résistance mécanique du fait que l'impédance du montage intégrateur branché à sa sortie est quasi infinie¹⁴.

Cependant, la plage de régime nous intéressant pour le moteur est principalement entre 10Hz et 300Hz, ce que ce système ne peut fournir. Il a donc été choisi de prendre un moteur triphasé pédagogique au lycée pour faire la partie à bas régime, du fait que la massivité de celui-ci permettait d'avoir des bas-régimes relativement constant grâce à l'inertie importante du rotor. Cependant ce montage s'avérera extrêmement peu fiable et instable pour des raisons inconnues, d'autant plus que la sinusoïde produite par ce générateur était énormément distordue. Ceci a conduit à l'abandon du projet d'utiliser un dynamoteur pour produire nos signaux d'entrée, nous forçant à chercher de l'équipement hors du lycée.

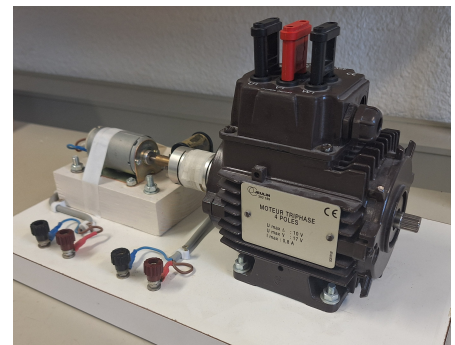


FIGURE 25 – Dynamoteur pédagogique, instable à l'usage.

11. Ici il s'agit en réalité d'un moteur Brushless à 4 paires de pôles mais les différences sont mineures comparé à un moteur triphasé, et ces derniers sont réversibles.

12. Incertitudes faites par multiples régressions linéaires selon la méthode de Monte-Carlo.

13. On utilise des modules "touts faits" AD8367 qui nécessitent un léger temps d'adaptation mais qui à signal constant donnent une amplitude de sortie constante, indépendant de Ω_g ; voir [16].

14. Résistance d'entrée de l'ordre de 150 k Ω , voir [13].

Annexe 3 : Théorie autour du MRS

On s'intéresse à une bobine du stator.

Par application de la loi des mailles et de la loi de FARADAY :

$$u = Ri + \frac{d\phi}{dt}$$

Ainsi :

$$uidt = Ri^2 di + id\phi$$

On reconnaît $dW = uidt$ le travail fourni par le générateur, $Ri^2 di$ le terme d'effet Joule (que l'on négligera par la suite) et $id\phi$ que l'on interprète comme la **variation d'énergie magnétique**, notée dE_m .

Alors :

$$E_m = \int_0^{\phi_0} id\phi$$

On définit de même : $E_m^{co} = \int_0^{i_0} \phi di$ la coénergie magnétique.

Par définition de l'inductance : $\phi = Li$, on réinjecte dans la coénergie et on trouve que :

$$E_m^{co} = \int_0^{i_0} Lidi$$

On remarque alors la relation suivante : $E_m + E_m^{co} = i_0\phi_0$ (1)

Pour un matériau linéaire et à position fixe : $L = \text{cte}$ donc $E_m^{co} = \frac{1}{2}Li_0^2$.
On retrouve alors sur la courbe ci-dessous que $E_m = E_m^{co}$.

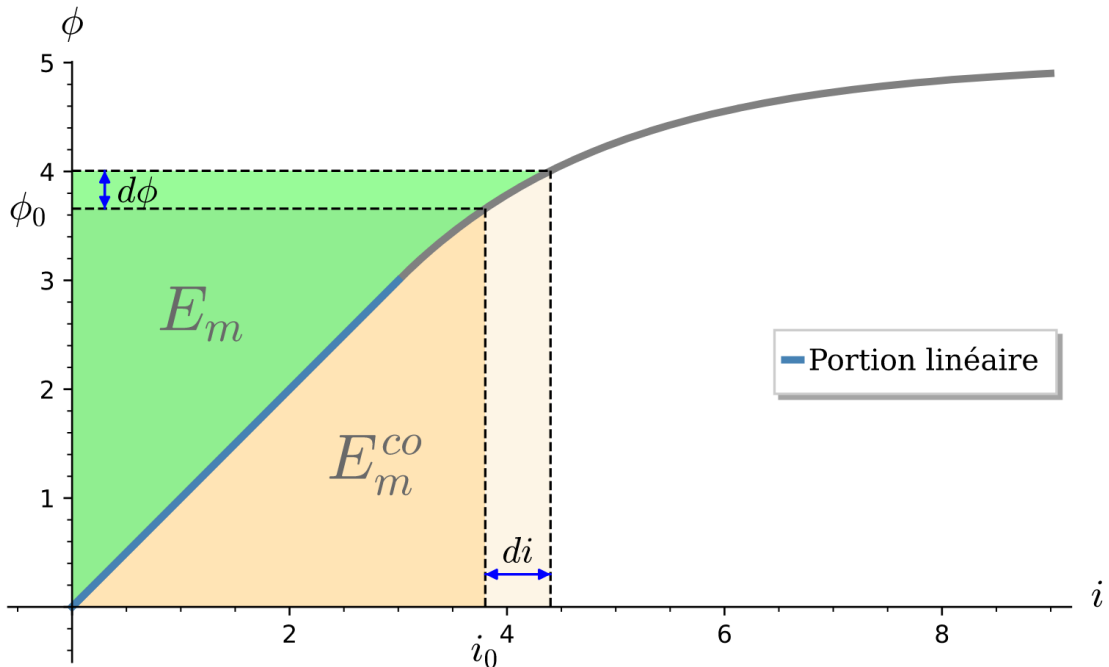


FIGURE 26 – Courbe représentative de l'énergie et de la coénergie (unités arbitraires).

Si l'on considère maintenant un **rotor mobile**, L dépend de θ l'angle entre les vecteurs du flux magnétique et du rotor (on fixe $\theta_0 = 0$ la position préférentielle du rotor). En régime *quasi-statique*, l'effet de la rotation est comme un couple exercé par un opérateur $\Gamma_{op} = -\Gamma$, le bilan précédent devient :

$$dE_m = dW + \Gamma_{op}d\theta = i d\phi - \Gamma d\theta$$

ou encore

$$dE_m = i d\phi - \Gamma d\theta$$

Sachant que E_m est une fonction de ϕ et de θ : $dE_m = \frac{\partial E_m}{\partial \phi} d\phi + \frac{\partial E_m}{\partial \theta} d\theta$

On peut donc affirmer :

$$\begin{cases} i = \frac{\partial E_m}{\partial \phi} \Big|_{\theta} \\ \Gamma = - \frac{\partial E_m}{\partial \theta} \Big|_{\phi} \end{cases}$$

Le potentiel thermodynamique $E_m = E_m(\phi, \theta)$ permet de déterminer le courant i et le couple Γ . C'est une fonction d'état qui décrit la conversion électromécanique. Il est cependant très difficile de connaître ϕ , ce qui n'est pas le cas pour i dont la définition est moins ambiguë. On décide donc de s'intéresser plutôt à la coénergie magnétique E_m^{co} , transformée de Legendre de E_m , car elle est fonction de i et de θ .

Alors d'après (1) :

$$dE_m^{co} = d(\phi i - E_m) = \phi di + \Gamma d\theta$$

Sachant que E_m^{co} est une fonction de i et de Γ :

$$\begin{cases} \phi = \frac{\partial E_m^{co}}{\partial i} \Big|_{\theta} \\ \Gamma = \frac{\partial E_m^{co}}{\partial \theta} \Big|_i \end{cases}$$

Le potentiel thermodynamique $E_m^{co} = E_m^{co}(i, \theta)$ permet de déterminer le flux ϕ et le couple Γ connaissant juste i et θ , ce qui est beaucoup plus exploitable.

Dans le cas d'un matériau linéaire, $L = L(\theta)$ donc $E_m^{co} = E_m = \frac{1}{2}L(\theta)i^2$

Dans ce cas, sachant que la symétrie du système donne que $L(\theta)$ est π -périodique, on introduit la décomposition en série de Fourier de L , et on admet (machine idéale, hypothèse de première harmonique) que tous les termes d'ordre supérieur à 1 sont négligeables :

$$L(\theta) = \sum_{k=0}^{+\infty} L_k \cos(2k\theta) \simeq L_0 + L_1 \cos(2\theta)$$

On en déduit alors la valeur de Γ :

$$\Gamma(\theta) = \frac{\partial E_m^{co}}{\partial \theta} \Big|_i \simeq L_1 i^2 \sin(2\theta)$$

avec θ le retard du rotor sur le champ magnétique.

Dans le cas d'un moteur à 4 pôles, $L(\theta)$ est $\frac{\pi}{2}$ -périodique et on a donc :

$$\Gamma(\theta) = \frac{\partial E_m^{co}}{\partial \theta} \Big|_i \simeq L_1 i^2 \sin(4\theta)$$

Afin de trouver une configuration approchant de la forme optimale vérifiant l'hypothèse de première harmonique, on cherche à faire épouser au rotor les lignes de champ magnétique (comme visibles figure 4), donnant industriellement des formes données ci-contre.

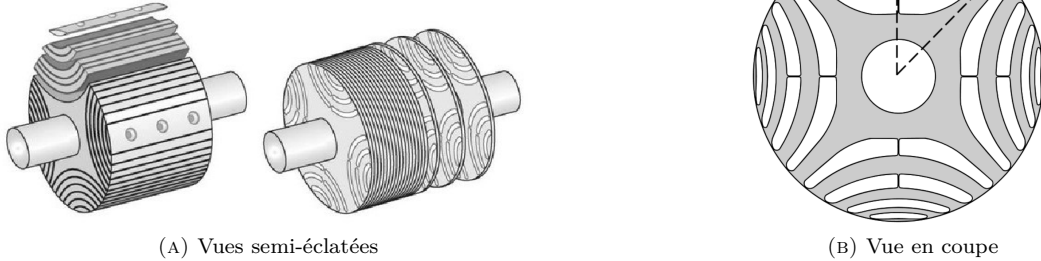
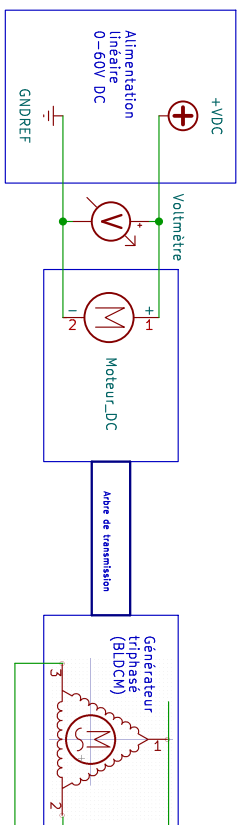
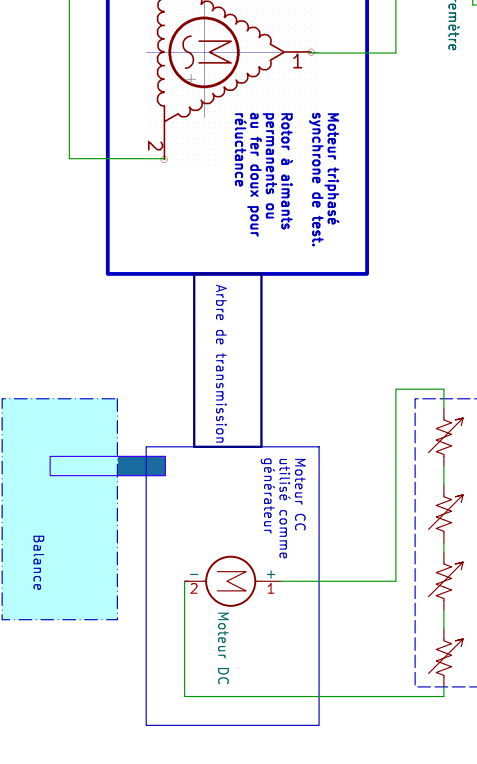
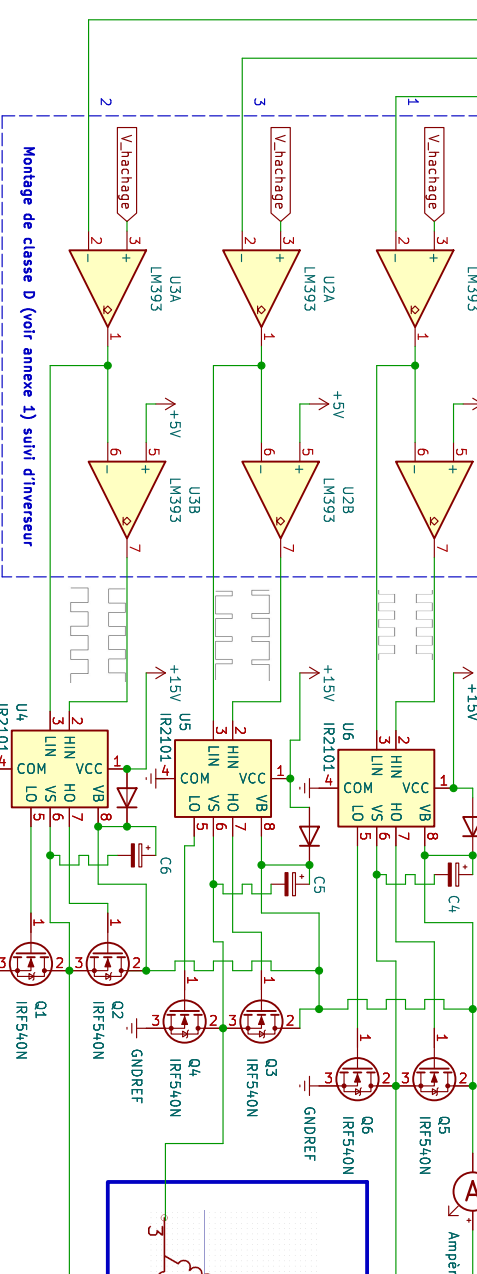
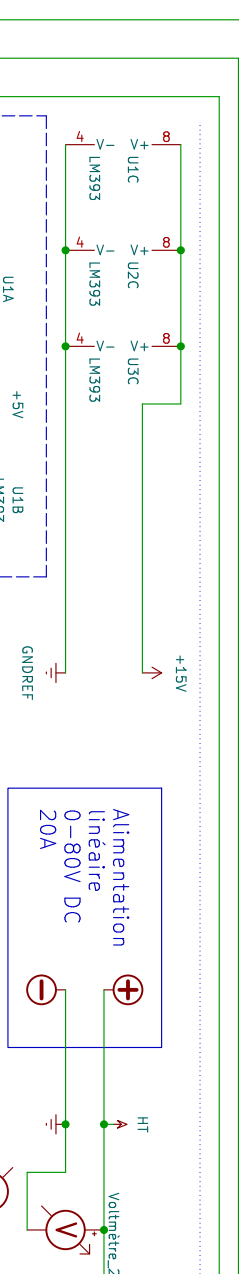
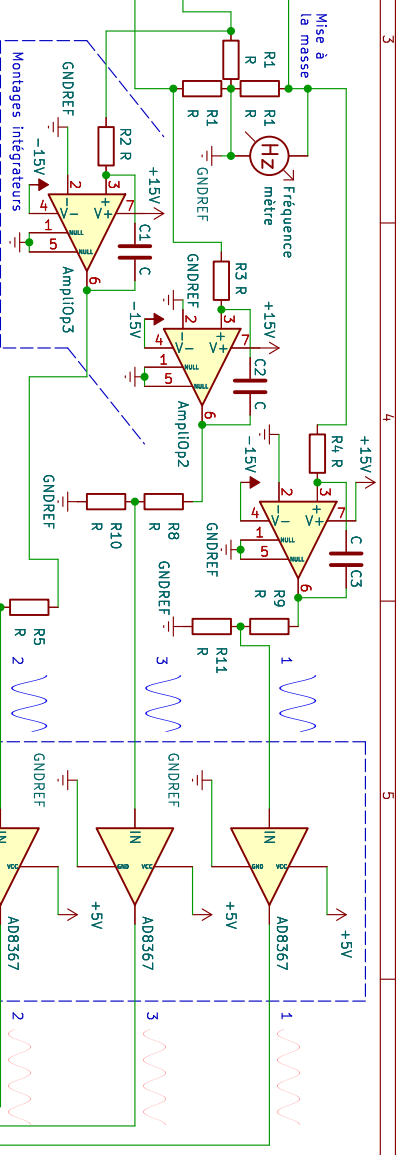


FIGURE 27 – Exemples de rotors 4 pôles de MRS industriels [6].



Montage Dynamoteur (voir Annexe 2)



Annexe 4 : Schéma électrique du montage complet

Auteur : Aloïs COQUILLARD

Fichier : T1PE.kicad_sch

Projet : T1PE moteurs synchrones

Taille : A3 Date : 17/12/2023

Kicad E.D.A. kicad 7.0.9

Rev : 1.4

Id : 1/1